

银河系中的红外尘泡与CO分子气体成协性研究^{*}

曾曙光^{1,2} 张俊杰^{1,2} 黄瑶^{1,2†} 刘德剑^{1,2} 张鹏^{1,2} 江治波³
陈志维³ 郑胜^{1,2} 张瑞^{1,2} 罗骁域^{1,2}

(1 三峡大学天文与空间科学中心 宜昌 443002)

(2 三峡大学数理学院 宜昌 443002)

(3 中国科学院紫金山天文台 南京 210023)

摘要 基于 WISE (Wide-Field Infrared Survey Explorer)、GLIMPSE (Galactic Legacy Infrared Mid-Plane Survey Extraordinaire)和 MIPS GAL (Multiband Imaging Photometer for Spitzer Galactic)的红外巡天数据,结合银河画卷的CO分子气体巡天数据,系统性分析了银河系中银经 $10^\circ \leq l \leq 20^\circ$ 、银纬 $|b| \leq 5^\circ$ 区域内的红外尘泡与CO分子气体的成协性.设计了一种基于高斯过程回归的数据分析方法,在143个已发布的红外尘泡样本中,发现44个红外尘泡与CO分子气体成协,占总样本量的30.8%.研究估算了与尘泡成协的CO分子光深、 H_2 柱密度、质量等物理参数,进行统计分析.对44个红外尘泡计算出平均柱密度约为 10^{22} cm^{-2} ,大部分尘泡质量不超过 $10^5 M_\odot$.与红外尘泡成协的分子气体 H_2 柱密度普遍达到了可能形成恒星的致密团块的条件,有26个尘泡可能正在膨胀,膨胀速度均值为 $2.75 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$.研究结果为理解红外尘泡与恒星形成等研究提供了样本.

关键词 恒星:形成, 星际介质:尘泡, 方法:数据分析

中图分类号 P155; **文献标识码** A

1 引言

红外尘泡(Infrared Dust Bubble)普遍认为是由大质量恒星或星团形成时产生的电离氢区(HII Region)与周围中性介质相互作用形成的,其主要观测特征表现为在中红外波段(如 $8 \mu\text{m}$)的尘埃连续谱图像中呈现出一个很亮的壳状结构^[1-2].红外尘泡的膨胀被认为是触发介质积累和恒星形成的重要机制^[3].因此,红外尘泡对恒星形成的研究具有重要意义^[4-5].

红外望远镜观测的巡天项目,如GLIMPSE

(Galactic Legacy Infrared Mid-Plane Survey Extraordinaire)、MIPS GAL (Multiband Imaging Photometer for Spitzer Galactic)和 WISE (Wide-Field Infrared Survey Explorer),为尘泡的搜寻及研究提供了观测数据^[6-8].其中, GLIMPSE中 Spitzer-IRAC (Spitzer Space Telescope - Infrared Array Camera) $8 \mu\text{m}$ 波段主要示踪了多环芳烃(Polycyclic Aromatic Hydrocarbon, PAH)分子或分子簇的发射,可以显示出红外尘泡很亮的壳状结构^[9]. $8 \mu\text{m}$ 壳层环内部充满了 MIPS GAL $24 \mu\text{m}$ 的红外辐射,示踪了被激发星释放的UV

2024-12-16收到原稿, 2025-02-20收到修改稿

^{*}国家自然科学基金项目(U2031202、12373030、12403052)资助

[†]huangyao@ctgu.edu.cn

(Ultraviolet)光子所加热的尘埃颗粒,往往与电离氢区成协^[10]. WISE的12 μm 和22 μm 波段分别与GLIMPSE 8 μm 和MIPSGAL 24 μm 波段有相似的观测特征^[11]. 红外尘泡的壳状结构与分子气体也有较好的成协性,利用分子谱线可以研究尘泡的起源及其与星际介质相互作用^[1]. 分子谱线通常具有特定的临界密度、激发温度和运动学信息,对研究与红外尘泡相关的分子气体起重要作用.

目前,关于尘泡的研究已经相当广泛. 对于大量样本的研究,主要基于不同波段红外数据,例如Hattori等人对Spitzer观察到的红外尘泡的中红外和远红外特性进行了统计研究^[12]. 对于单个或少量样本的研究,主要是基于不同观测数据的协同研究,例如基于红外和射电观测数据,Liu等^[13]利用MWISP (Milky Way Imaging Scroll Painting)^[14]中CO谱线和红外数据识别出一个尘泡,研究了尘泡的物理特性以及尘泡与周围环境的作用. Yan等人利用MWISP的 ^{12}CO 、 ^{13}CO 和 C^{18}O ($J = 1-0$, J 为分子转动能级的量子数)谱线,对银河系中13个红外尘泡分布区域的物理性质和恒星形成(Star Formation, SF)过程进行了详细研究^[15]. 这些基于单个或者少量样本的研究,大多都需要人工证认与红外尘泡相关CO分子气体,无法全面揭示尘泡与分子气体成协的一般规律. 如果在恒星形成比较活跃的区域,基于红外尘泡形态特征,证认与之成协的分子气体可以建立一个红外尘泡—分子气体样本集,从而系统性研究与尘泡成协的分子气体特性.

考虑到在银道面银经 $10^\circ \leq l \leq 20^\circ$ 、银纬 $|b| \leq 5^\circ$ 范围内包含了丰富的恒星形成区,例如W39、M16、M17、W33和W31,该区域样本集的建立可以更好地推动与红外尘泡成协的CO分子气体的研究. 本文将基于已发布的红外尘泡样本,研究该范围内与尘泡成协的CO分子气体特性. 论文的第2节介绍了研究所采用的数据集,包括WISE、GLIMPSE、MIPSGAL的红外巡天数据, MWISP的CO谱线数据集以及红外尘泡样本;第3节阐述了红外尘泡与CO分子气体成分关联的数据分析方法;第4节分析了红外尘泡与CO分子气体之间的关联结果,探讨了红外尘泡和CO分子气体在形态

上的成协性,并计算及统计了尘泡的物理参数;第5节为总结与讨论.

2 数据介绍

2.1 MWISP

MWISP是利用紫金山天文台的PMODLH (Purple Mountain Observatory Delingha at Qing-Hai Station)-13.7 m毫米波望远镜(<http://www.radioast.nsd.cn/mwisp.php>),采用大视场快速高效巡天的多波束OTF (On-The-Fly)观测方法对银道面 ^{12}CO 、 ^{13}CO 和 C^{18}O ($J = 1-0$) 3条谱线进行同时观测的系统巡天计划^[16-18]. 该计划观测的天区范围为 $10^\circ \leq l \leq 20^\circ$ 和 $|b| \leq 5^\circ$,数据覆盖共计10941个单元,其中每个单元的大小为 $30' \times 30'$. ^{12}CO 的均方根噪声水平约0.5 K,另两条谱线约0.3 K的噪声水平. ^{12}CO 谱线对应的速度分辨率约为 $0.159 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$, ^{13}CO 和 C^{18}O 谱线对应的速度分辨率约为 $0.166 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ ^[19],观测这些分子谱线的空间分辨率是 $52'' \pm 3''$. 本文选取MWISP中 $10^\circ \leq l \leq 20^\circ$ 和 $|b| \leq 5^\circ$ 区域中3条谱线的数据.

2.2 红外尘泡样本

红外尘泡的样本主要来自:(1) Churchwell等人利用GLIMPSE巡天的3.6–8.0 μm 数据,在2006和2007年,发布了两个共计591个红外尘泡的目录(以下简称CP06和CWP07)^[20-22];(2)由35000余人参与的公众科学倡议活动(Citizen Science Initiative),名为“银河项目”(The Milky Way Project),利用GLIMPSE和MIPSGAL巡天的数据,在2012年发布了一个包含5106个红外尘泡的目录^[23](以下简称SPK12);(3)利用GLIMPSE、MIPSGAL等巡天的数据,银河项目在2019年确定了2600个红外尘泡的更新目录^[24](以下简称JPK19);(4) Hanaoka等人利用中红外波长的AKARI巡天数据(中心波长9 μm 和18 μm)发布了包含179个红外尘泡的目录^[25](以下简称HK19).

基于这5个红外尘泡源表(CP06、CWP07、SPK12、JPK19和HK19),选取了在银经 $10^\circ \leq l \leq 20^\circ$ 和银纬 $|b| \leq 5^\circ$ 区域内的红外尘泡. 在整合5个

红外尘泡源表的过程中, 通过对尘泡的中心坐标进行交叉匹配, 排除了源表中重复的红外尘泡, 最终获得了该范围内521个样本. 研究采用各源表中有效半径作为评估红外尘泡尺寸的标准. 针对多个源表中重复的尘泡, 鉴于SPK12样本在总样本中占据最大比例, 因此优先采用SPK12源表中尘泡的有效半径. 依据此标准, 其他尘泡有效半径的选取优先级依次为JPK19、CP06和CWP07、HK19. 由于MWISP中观测CO谱线的分辨率为 $52'' \pm 3''$, 与小尺寸红外尘泡相关的分子气体成分难以分辨. 因此, 本文选取了143个有效半径大于 $1'$ 的红外尘泡样本. 样本目录(以下代称TOC-A1)已上传至ScienceDB平台 (<https://www.scidb.cn/en/s/riq2Mv>), TOC-A1中各栏如下: (1)是本文统一定义的红外尘泡名称, (2)是来自JPK19的红外尘泡名称, (3)是来自SPK12的红外尘泡名称, (4)是来自CP06、CWP07的红外尘泡名称, (5)是来自HK19的红外尘泡名称, (6)和(7)分别是红外尘泡中心位置的银经和银纬, (8)是有效半径.

本文主要利用来自WISE、GLIMPSE和MIPSGAL巡天的数据, 其数据说明如表1所示. 考虑到GLIMPSE巡天的红外图像相对于WISE有更好的空间分辨率, WISE则具有相对更广的巡天范围. 因此, 对于银纬 $|b| \leq 1^\circ$ 区域的红外尘泡样本, 优先使用GLIMPSE巡天数据. $1^\circ < |b| \leq 5^\circ$ 区域的样本利用WISE巡天的数据.

表 1 红外巡天数据说明
Table 1 Description of infrared survey data

Infrared Survey	Band	Resolution	Observation	Range
GLIMPSE	3.6 μm	1.5''–1.9''		$5^\circ \leq l \leq 65^\circ, b \leq 1^\circ$
	4.5 μm			$2^\circ \leq l \leq 5^\circ, b \leq 1.5^\circ$
	5.8 μm			$ l < 2^\circ, b \leq 2^\circ$
	8.0 μm			$5^\circ \leq l \leq 63^\circ, b \leq 1^\circ$
MIPSGAL	24 μm	6.0''		$ l \leq 5^\circ, b \leq 3^\circ$
				$298^\circ \leq l \leq 355^\circ, b \leq 1^\circ$
WISE	3.4 μm	6.1''		all sky
	4.6 μm			
	12 μm			
	22 μm			

3 与红外尘泡成协的CO气体证认

与尘泡相关的分子气体结构可能非常复杂, 任何给定的视线方向通常包含多条发射线, 没有单一算法可以自动且唯一地确定出与红外尘泡对应的CO分子气体速度成分. 因此, 本文使用MWISP的CO谱线数据和GLIMPSE、MIPSGAL和WISE的红外巡天数据, 设计了一种基于高斯过程回归的数据分析方法, 来确定与红外尘泡相关的CO分子气体速度成分. 具体流程图如图1所示.

第1步: 提取尘泡区域的谱线数据. 对于每一个红外尘泡样本, 确定一个范围(以红外尘泡中心

坐标为中心, 大小为 $5 \text{ Reff} \times 5 \text{ Reff}$, Reff 为有效半径), 对MWISP中CO谱线数据, 切割出该范围内速度区间 $-50 \sim 150 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 的数据块. 考虑到尘泡是一个环状结构, 通过观察, 发现以尘泡中心扩展的0.5到1.5倍有效半径形成的环状区域可以覆盖与尘泡相关的CO分子气体的壳状区域. 以红外尘泡G15.684–0.290为例, 图2为G15.684–0.290环状区域的CO谱线展示, T_{MB} 为主波束温度, V_{LSR} 为本地静止参考系速度. 其中, 图2 (a)分别以实线、虚线、点划线的方式展示 ^{12}CO 、 ^{13}CO 和 C^{18}O 平均谱, C^{18}O 谱线按3倍强度值绘制, 图2

(b)中实线展示了 ^{12}CO 的高斯滤波发射谱线,虚线显示了每个局部发射峰经过高斯过程回归(Gaussian Process Regression, GPR)算法拟合后的结果,

阴影部分标识了最终确定的速度区间候选体,点划线代表强度阈值线,具体作用在下面步骤中给出.

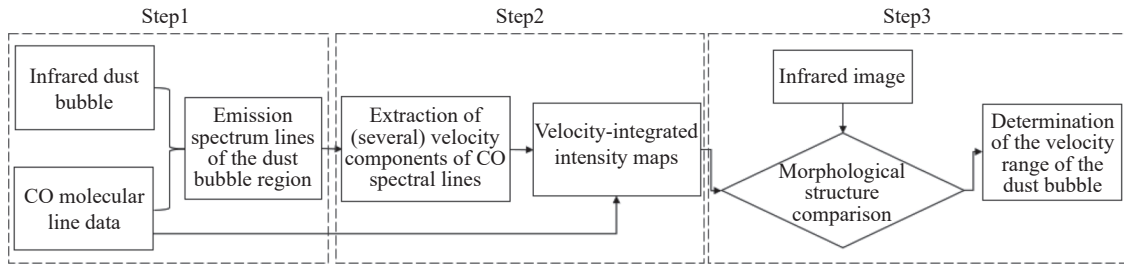


图 1 红外尘泡在CO分子气体数据关联流程图

Fig. 1 Flowchart of the correlation between infrared dust bubbles and CO molecular gas data

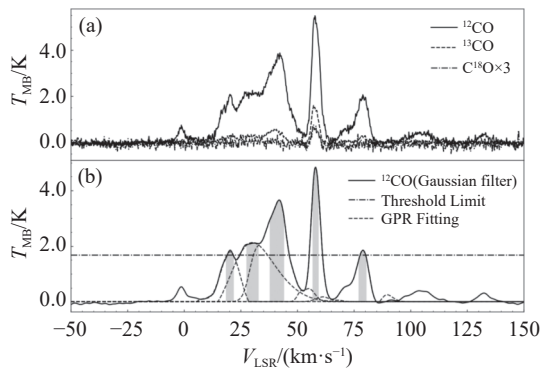


图 2 G15.684–0.290环状区域的 ^{12}CO 、 ^{13}CO 和 C^{18}O 平均谱。(a)显示了来自MWISP的3个谱线数据的分布,其中 C^{18}O 谱线按3倍强度值绘制。(b)实线显示了 ^{12}CO 的高斯滤波发射谱线,点划线为阈值线(4 rms),用于排除峰值低的发射峰,虚线是使用GPR算法拟合后的局部发射峰,阴影部分为确定出的5个候选速度范围。

Fig. 2 The average spectra of the ^{12}CO , ^{13}CO and C^{18}O in the annular region of G15.684–0.290. (a) Shows the distribution of the three spectral line data from MWISP, where the C^{18}O line is plotted at 3 times its intensity value. (b) The solid line represents the Gaussian-filtered emission spectrum of ^{12}CO , the dash-dotted line indicates the threshold line (4 rms), used to exclude emissions with low peak values, the dashed line represents the local emission peaks fitted using GPR algorithm, and the shaded areas delineate the five identified candidate velocity ranges.

第2步: 基于尘泡区域的发射谱线数据,采用数据分析方法确定出与尘泡区域相关的分子发射的若干速度区间候选体。

(1)考虑到数据噪声可能产生的误差,设置了4倍rms (root mean square)值作为强度阈值,来排

除波峰峰值强度低于阈值的局部发射峰;

(2)为了便于局部发射峰的确定和提取,使用标准差 $\sigma = 6$ 的高斯滤波器对该发射谱线数据进行平滑处理;

(3)提取每一个局部发射峰(指相邻两个波谷之间的发射谱线),采用GPR的监督学习方法依次进行拟合^[26],得到了完整的谱线分量;

(4)对每一个完整的发射峰,选择峰的“尖端”部分,即波峰峰值的0.8倍对应的两个点之间的速度区间分量,作为与尘泡区域相关的CO分子气体成分候选体。

第3步: 利用目视检查精确确定出与尘泡对应的CO谱线速度范围。根据第2步确定的候选体速度范围,利用第1步切割得到与尘泡相关的CO谱线数据块,在不同速度范围内进行积分。将积分得到的 ^{12}CO 谱线发射等值线分别叠加在Spitzer-IRAC 8 μm 波段的图像上。考虑到分子气体发射强度图与Spitzer-IRAC 8 μm 和WISE 12 μm 波段的红外图像的结构分布有很好的成协性,通过目视检查来对比两者的形态结构,最终在候选体速度成分中唯一地确定出与红外尘泡成协的速度成分。为了更为精准地确定出与尘泡对应分子气体的起始-结束速度,针对已确定的速度区间,通过目视检查CO谱线速度成分附近的每一个单速度通道图像(位置-位置(l, b)图),严格地对比红外尘泡图像的结构形态,准确地定位出尘泡在CO分子气体的速度开始(V_b)和结束(V_e)的位置以及结构最相似的速度通道(V_t)。

图3展示了红外尘泡G15.684-0.290以及Spitzer-IRAC 8 μm 波段与不同候选体速度区间 ^{12}CO 积分强度等值线叠图, 等值线水平显示为峰值强度的30%-90%, 步长为相应发射的峰值积分强度的10%. 通过人工检查, 可以发现图3 (e)中速度范围为56.67-59.53 $\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$ 的等值线轮廓与红外图像8 μm 波段的结构分布极为相似, 具有较高的成协性. 而在其他图像(b)、(c)、(d)、(f)中未观察到显著的相似性. 这表明在相同的空间分布中, 许多速

度成分与红外尘泡并不成协. 因此, 需要通过人工检查的方法来识别与尘泡相关的CO分子气体. 最后, 利用DS9软件程序包, 人工检查了CO谱线数据中图3 (e)速度区间附近的速度切片图像. 精确确定出与尘泡相关CO分子气体开始和结束的速度分别为54.29 $\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$ 和61.59 $\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$, 以及与红外尘泡形态结构最相似的速度切片(57.94 $\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$)作为最佳速度.

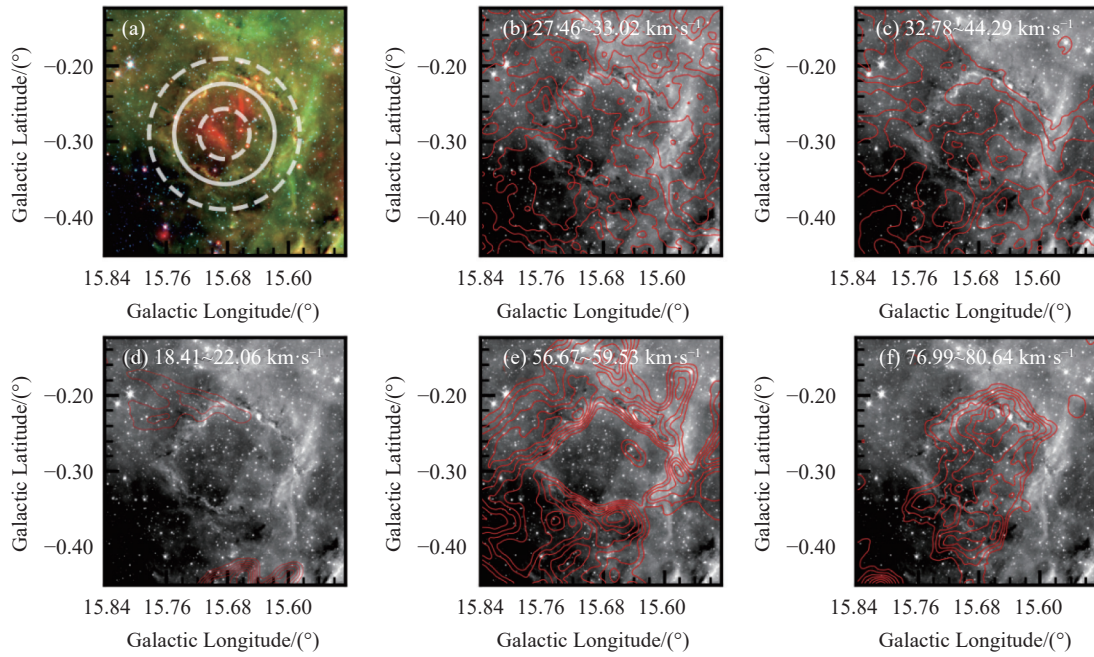


图 3 (a) 尘泡G15.684-0.290的三色图像. 红色、绿色和蓝色分别表示Spitzer/MIPS 24 μm 、Spitzer/IRAC 8 μm 和Spitzer/IRAC 5.8 μm 波段. (b)、(c)、(d)、(e)和(f)展示了Spitzer-IRAC 8 μm 波段的灰度图像. 黑色标签标示出候选体速度范围, 红线为 ^{12}CO 谱线数据在该速度范围内积分得到的等值线. 等值线水平显示为30%-90%, 步长为相应发射的峰值积分强度的10%.

Fig. 3 (a) Three-color image of G15.684-0.290. Red, green, and blue show the Spitzer/MIPS 24 μm , Spitzer/IRAC 8 μm , and Spitzer/IRAC 5.8 μm band. (b), (c), (d), (e), and (f) display grayscale images from the Spitzer-IRAC 8 μm band. The black labels indicate the velocity range of the candidates, and the red lines represent the contours obtained by integrating the ^{12}CO spectral line data over that velocity range. The contour levels are displayed at 30%-90%, with a step size of 10% of the corresponding peak integrated intensity of the emission.

4 分子气体查找结果与分析

4.1 基于CO谱线的尘泡表

采用第3节所述方法, 在143个红外尘泡样本中, 成功识别出44个与红外尘泡相关的CO分子气体速度成分, 占比约为30.8%. 这表明从形态学角

度来看, 并非所有红外尘泡都与CO分子气体成协. 与尘泡相关CO分子气体目录(以下代称TOC-A2)已上传至ScienceDB平台 (<https://www.scidb.cn/en/s/riq2Mv>), TOC-A2中各栏如下: (1)是红外尘泡名, (2)和(3)分别是中心位置的银经和银纬, (4)是有效半径, (5)、(6)和(7)分别是尘泡的 V_t 、 V_b

和 V_e 。在银河系范围的空间分布如图4所示。图5描绘了红外尘泡在银纬面上的数量分布。观察结果显示,当前发布的红外尘泡样本主要分布在银纬 $|b| \leq 1^\circ$ 范围内,有效半径大于 $1'$ 的红外尘泡所占比例不高,且主要分布在约 $-0.6^\circ \leq b \leq 0.3^\circ$ 的低纬度带内。结合图4分析,已确定CO分子气体成分的红外尘泡大多也分布在这一范围内。

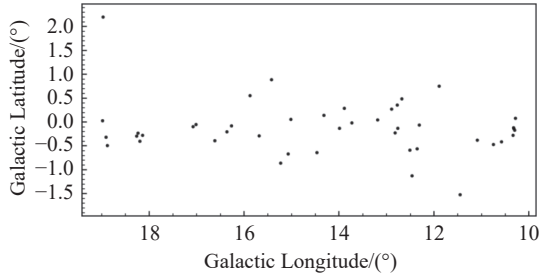


图 4 红外尘泡的空间分布图。黑点为已确定CO分子气体成分的红外尘泡,展示了在银河系 $10^\circ \leq l \leq 20^\circ$, $|b| \leq 5^\circ$ 区域的空间分布。

Fig. 4 Spatial distribution map of infrared dust bubbles.

The black dots represent infrared dust bubbles with confirmed CO molecular gas compositions, illustrating their spatial distribution in the Milky Way within the region of $10^\circ \leq l \leq 20^\circ$ and $|b| \leq 5^\circ$.

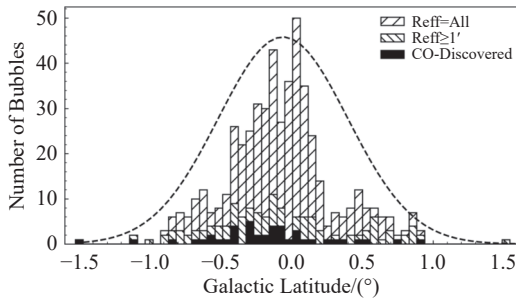


图 5 尘泡的银纬-数量分布图,其中正斜杠为 $10^\circ \leq l \leq 20^\circ$, $|b| \leq 5^\circ$ 区域范围内的红外尘泡,其数量在银纬面上高斯分布如虚线所示。反斜杠为该区域范围内 Reff 不小于 $1'$ 的红外尘泡。黑色为已确定CO分子气体速度信息的红外尘泡。

Fig. 5 Distribution of infrared dust bubbles as a function of Galactic latitude, where the forward slash pattern represents infrared dust bubbles in the region of $10^\circ \leq l \leq 20^\circ$ and $|b| \leq 5^\circ$. Their quantity is Gaussian-distributed on the Galactic latitude plane as indicated by the dotted line. The backslash pattern denotes infrared dust bubbles within this region that have an effective radius (Reff) of no less than $1'$. Black represents infrared dust bubbles for which the velocity information of CO molecular gas has been determined.

在44个红外尘泡样本中,多个样本已被用于研究其相关的CO分子气体,如N6^[27]、N22^[28]、N14^[29]、N24^[30]。这些研究中确定的与尘泡相关的CO分子气体成分与本文的研究结果一致,验证了本文中确定的速度分量的准确性。Yuan等人发现与红外尘泡N6相关的CO分子气体存在两个不连续的速度分量,分别位于 $16 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $45.7 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 附近^[27],与本文确定的速度范围是一致的。图6展示了尘泡G12.511-0.590 (N6)的形态结构,如图6所示,尘泡N6在Spitzer-IRAC $8 \mu\text{m}$ 波段中的结构形态,由东北部和西南部的环状结构组成。在图6 (b)和图6 (c)中,通过观察 ^{12}CO 谱线速度积分得到的等高线分布,可以发现东北部和西南部有明显相似的发射结构,最终确定的速度区间分别为 $13.65\text{--}18.57 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $45.08\text{--}49.84 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

对于难以确定其CO分子气体的99个红外尘泡。本文分析了两种情形:(1)以尘泡G10.879+0.092为例,图7展示了关联方法第2步的结果,Spitzer-IRAC $8 \mu\text{m}$ 波段揭示了尘泡的壳状结构,将不同速度区间候选体下 ^{12}CO 谱线积分得到的等值线,分别叠加在Spitzer-IRAC $8 \mu\text{m}$ 波段上。观察到多个速度分量的CO谱线发射与Spitzer-IRAC $8 \mu\text{m}$ 波段的形态结构均不匹配,说明红外尘泡G10.879+0.092可能并不是一个真正的尘泡,可能是视线不同气体成分叠加显示的结果。这一情形的样本数量较多,共有76个。(2)以尘泡G12.402-0.464为例,图8以相同的方式展示了尘泡G12.402-0.464在关联方法第2步的结果,观察到图8 (e)与红外图像 $8 \mu\text{m}$ 波段的发射在同一个区域比较集中,形态较为接近。但受到观测谱线分辨率($52'' \pm 3''$)的限制,不能完全确定该速度成分与红外尘泡相关,这一类情形的样本共23个。

4.2 尘泡的物理参数

在计算与红外尘泡相关的CO分子气体物理参数过程中,需要确定其在分子气体上的数据范围。首先,对于每个红外尘泡样本,根据已确定的速度范围,裁剪出以尘泡坐标为中心的数据块,其空间大小为 $7 \text{ Reff} \times 7 \text{ Reff}$ 。然后,采用最大类间方差法对每个尘泡对应的分子气体积分强度图进行自适

应阈值分割, 确定出信号区域的边界. 再通过手动定义外部边界, 将尘泡对应的分子气体与周围分子气体分离. 最终, 用于计算尘泡物理参数的分子气体由强度阈值和手动边界的交集确定. 图9展示了与尘泡G15.684-0.290相关 ^{12}CO 谱线的速度积分强度图. 图9 (a)中的实线描绘了手动定义的外

部边界. 该边界是通过对比观察Spitzer-IRAC $8\ \mu\text{m}$ 或WISE $12\ \mu\text{m}$ 图像的结构来确定的. 虚线描绘了通过最大类间方差法确定的阈值线. 图9 (b)显示了这两个区域的交集及与尘泡相关的分子气体范围. 该分子气体用于计算物理参数, 如激发温度、光学深度、柱密度等.

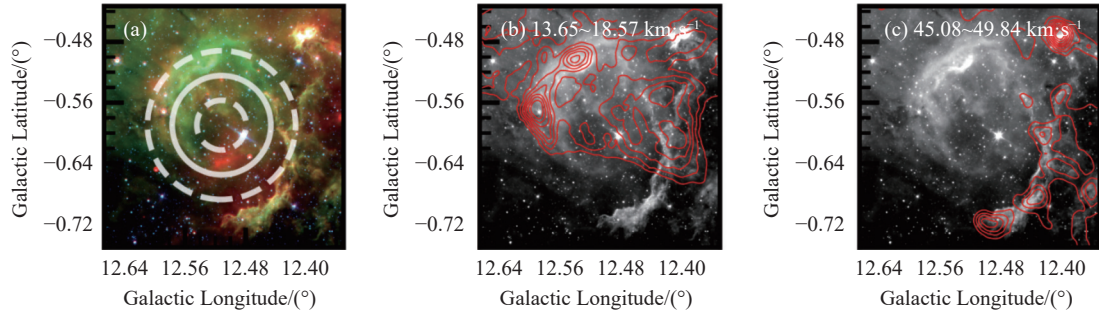


图 6 (a)尘泡G12.511-0.590 (N6)的三色图像, 显示方式同图3 (a). (b)、(c)显示方式同图3.

Fig. 6 (a) Three-color image of G12.511-0.590 (N6) are displayed in the same manner as Fig. 3 (a). The display methods for (b) and (c) are the same as in Fig. 3.

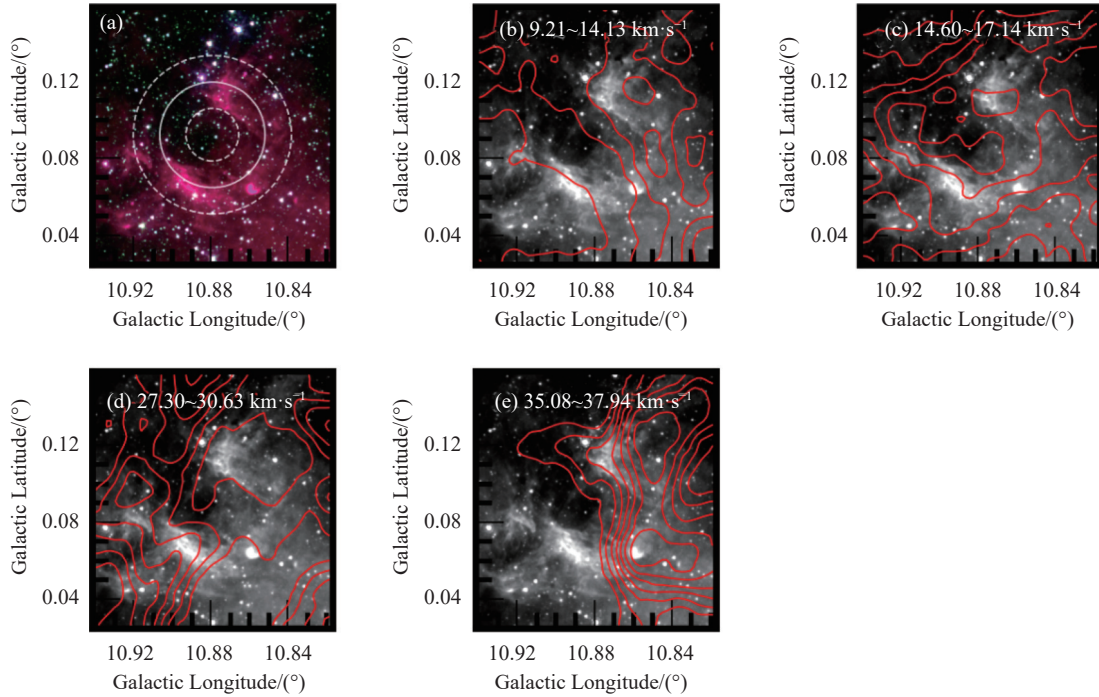


图 7 (a)尘泡G10.879+0.092的三色图像, 显示方式同图3 (a). (b)、(c)、(d)和(e)显示方式同图3.

Fig. 7 (a) Three-color image of G10.879+0.092 are displayed in the same manner as Fig. 3 (a). The display methods for (b), (c), (d), and (e) are the same as in Fig. 3.

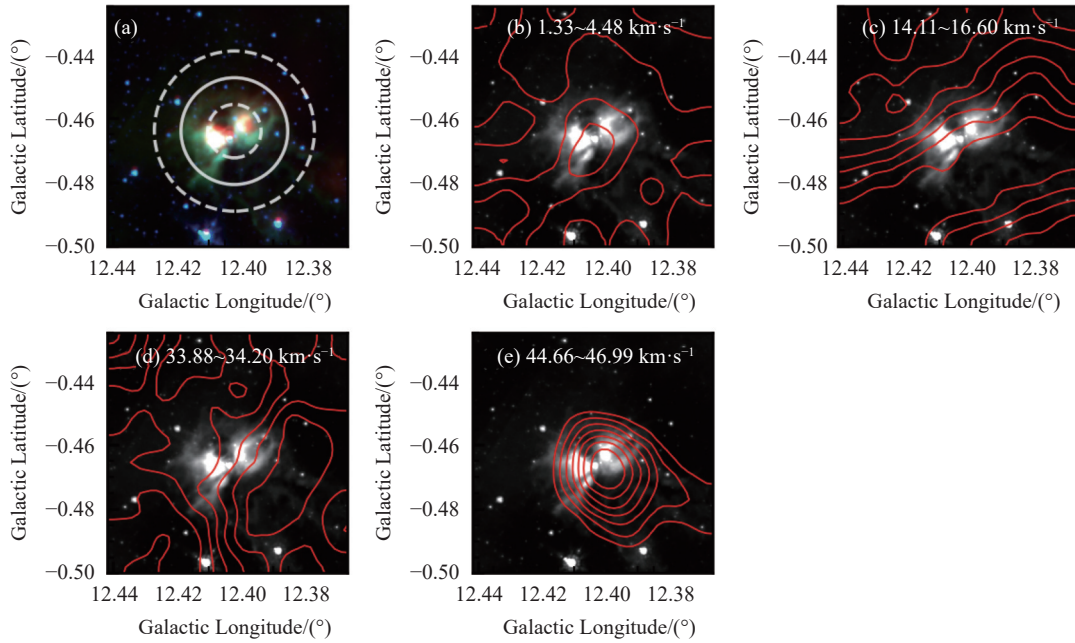


图 8 (a) 尘泡 G12.402-0.464 的三色图像, 显示方式同图 3 (a). (b)、(c)、(d) 和 (e) 显示方式同图 3.

Fig. 8 (a) Three-color image of G12.402-0.464 are displayed in the same manner as Fig. 3 (a). The display methods for (b), (c), (d), and (e) are the same as in Fig. 3.

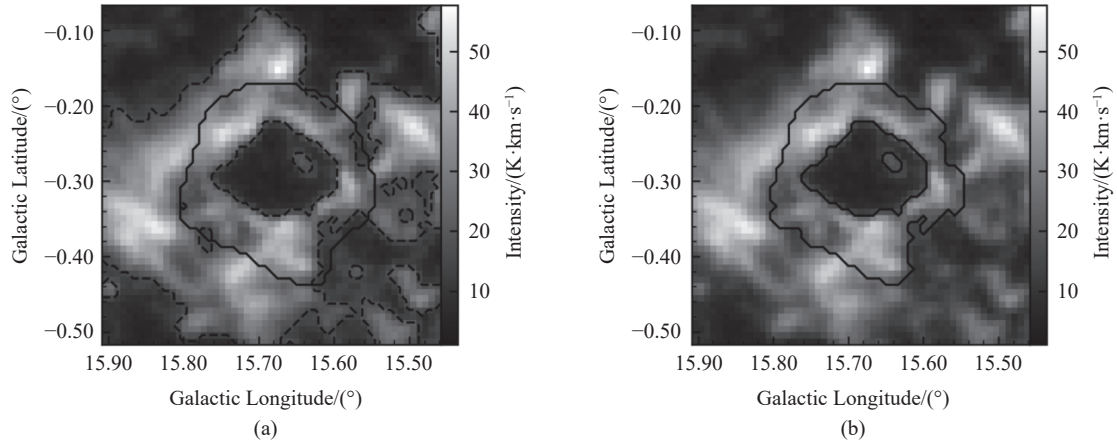


图 9 与尘泡 G15.684-0.290 相关 ^{12}CO 谱线的速度积分强度 (W_{CO}) 图. 图 (a) 中虚线和实线分别代表基于强度阈值和手动定义的内外边界. 图 (b) 展示了与尘泡相关的分子气体.

Fig. 9 The velocity-integrated intensity (W_{CO}) map of the ^{12}CO spectral line associated with the dust bubble G15.684-0.290. (a) The dashed and solid lines represent the inner and outer boundaries defined based on intensity threshold and manual definition, respectively. (b) Shows the molecular gas associated with the dust bubble.

根据图 9 所示的方法, 本文利用 MWISP 中 ^{12}CO 、 ^{13}CO 和 C^{18}O 谱线数据, 分别确定出与 44 个尘泡相关的不同 CO 分子气体范围. 在局部热力学

平衡 (Local Thermodynamic Equilibrium, LTE) 的假设下, 对每个尘泡的物理性质进行了估计. 通常可以假设 ^{12}CO 发射是光学厚的, 基于与尘泡相关

的 ^{12}CO 分子气体, 激发温度 T_{ex} ^[31]通过下式进行逐像素估算可得到激发温度峰值:

$$T_{\text{ex}}(^{12}\text{CO}) = \frac{h\nu}{k} \left[\ln \left(1 + \frac{h\nu/k}{T_{\text{MB}} + J_{\nu}(T_{\text{bg}})} \right) \right]^{-1}, \quad (1)$$

其中 $J_{\nu}(T)(T_{\text{bg}})$ 为温度 T 时宇宙背景的黑体辐射, 表达式如下:

$$J_{\nu}(T) = \frac{\frac{h\nu}{k}}{\exp\left(\frac{h\nu}{kT}\right) - 1}. \quad (2)$$

上两式中, ν 为CO谱线的观测频率, k 为玻尔兹曼常数, 值为 1.38×10^{-23} J/K, h 为普朗克常数, 值为 6.63×10^{-34} J·s, $T_{\text{bg}} = 2.73$ K为宇宙背景温度.

^{13}CO 和 C^{18}O 谱线通常为光学薄. 利用与尘泡相关的 ^{13}CO 和 C^{18}O 分子气体, ^{13}CO 和 C^{18}O 谱线的光学深度 τ ^[31]估算如下:

$$\tau = -\ln \left(1 - \frac{T_{\text{MB}}}{J_{\nu}(T_{\text{ex}}) - J_{\nu}(T_{\text{bg}})} \right). \quad (3)$$

根据计算得出的激发温度和光学深度, ^{13}CO 和 C^{18}O 的柱密度 $N(^{13}\text{CO})$ 和 $N(\text{C}^{18}\text{O})$ 可以通过下式得出^[31]:

$$N(^{13}\text{CO}) = \frac{2.482 \times 10^{14} (T_{\text{ex}} + 0.88) \exp\left(\frac{5.289}{T_{\text{ex}}}\right)}{\exp\left(\frac{5.289}{T_{\text{ex}}}\right) - 1} \times \frac{\int T_{\text{MB}} dv \text{ (km/s)}}{J_{\nu}(T_{\text{ex}}) - J_{\nu}(T_{\text{bg}})} \times \frac{\tau}{1 - \exp(-\tau)} \text{ cm}^{-2}, \quad (4)$$

$$N(\text{C}^{18}\text{O}) = \frac{2.482 \times 10^{14} (T_{\text{ex}} + 0.88) \exp\left(\frac{5.269}{T_{\text{ex}}}\right)}{\exp\left(\frac{5.269}{T_{\text{ex}}}\right) - 1} \times \frac{\int T_{\text{MB}} dv \text{ (km/s)}}{J_{\nu}(T_{\text{ex}}) - J_{\nu}(T_{\text{bg}})} \text{ cm}^{-2}, \quad (5)$$

其中, $\int T_{\text{MB}} dv$ 表示分别对与尘泡相关的 ^{13}CO 和 C^{18}O 分子气体进行逐像素的积分.

利用关系式 $N_{\text{H}_2}/N_{^{13}\text{CO}} \approx 3.9 \times 10^5$ 和 $N_{\text{H}_2}/$

$N_{\text{C}^{18}\text{O}} \approx 3 \times 10^6$ ^[32], 可以分别估计出 H_2 柱密度 N_{H_2} (^{13}CO)和 N_{H_2} (C^{18}O). 根据第3节确定的最佳尘泡速度, 本文采用Reid等人开发的新运动距离估计器^[33], 推导出每一个尘泡的运动学距离. 尘泡的质量 M_{bubble} 按下式进行逐像素估计

$$M_{\text{bubble}} = \mu m_{\text{H}} N_{\text{H}_2} A, \quad (6)$$

其中, A 为尘泡的二维投影面积. μ 为平均分子量, 值为2.83. m_{H} 为氢原子质量, 值为 1.67×10^{-27} kg.

最终, 利用上述公式计算并统计了尘泡的相关物理参数. 物理参数目录(以下代称TOC-A3)已上传至ScienceDB平台(<https://www.scidb.cn/en/s/riq2Mv>), TOC-A3中各列信息, 从左到右各列分别为尘泡名称(ID)、尘泡中心银经、银纬坐标(GLON、GLAT)、尘泡的运动学距离(Distance)、激发温度峰值($T_{\text{ex,max}}$)、平均光学深度(τ_{ave} (^{13}CO), τ_{ave} (C^{18}O))、CO柱密度均值($\lg(N_{\text{ave}}^{13}(\text{CO}))$, $\lg(N_{\text{ave}}^{18}(\text{CO}))$)、 H_2 柱密度均值($\lg(N_{\text{ave}}^{13}(\text{H}_2))$, $\lg(N_{\text{ave}}^{18}(\text{H}_2))$)、CO柱密度峰值($\lg(N_{\text{max}}^{13}(\text{CO}))$, $\lg(N_{\text{max}}^{18}(\text{CO}))$)、 H_2 柱密度峰值($\lg(N_{\text{max}}^{13}(\text{H}_2))$, $\lg(N_{\text{max}}^{18}(\text{H}_2))$)、质量(Mass (^{13}CO), Mass (C^{18}O)). 与尘泡成协的CO分子激发温度峰值的直方图分布如图10所示, 主要分布在10–45 K之间, 中值约为30 K. 与尘泡成协的CO分子平均光学深度直方图分布如图11所示. 其中, 利用 ^{13}CO 和 C^{18}O 谱线分别估算出的平均光学深度低于0.5, 这表明光学薄假设基本成立. 利用计算出的激发温度和光学深度, 分别估算了与尘泡成协的CO分子 H_2 柱密度. 如图12所示, 展示了与尘泡成协的CO分子柱密度 $N_{\text{H}_2}(^{13}\text{CO})$ 和 $N_{\text{H}_2}(\text{C}^{18}\text{O})$ 峰值和均值的直方图分布, 与尘泡成协的CO分子柱密度 $N_{\text{H}_2}(^{13}\text{CO})$ 和 $N_{\text{H}_2}(\text{C}^{18}\text{O})$ 均值处于 $10^{21.0} - 10^{22.9} \text{ cm}^{-2}$ 范围内, 中值分别为 $10^{21.9} \text{ cm}^{-2}$ 和 $10^{22.1} \text{ cm}^{-2}$. 与尘泡成协的CO分子柱密度 $N_{\text{H}_2}(^{13}\text{CO})$ 和 $N_{\text{H}_2}(\text{C}^{18}\text{O})$ 峰值处于 $10^{21.5} - 10^{23.3} \text{ cm}^{-2}$ 范围内, 中值分别为 $10^{22.4} \text{ cm}^{-2}$ 和 $10^{22.5} \text{ cm}^{-2}$. 基于计算得出的柱密度 $N_{\text{H}_2}(^{13}\text{CO})$ 和 $N_{\text{H}_2}(\text{C}^{18}\text{O})$, 分别计算了尘泡的质量, 质量的直方图分布如图13所示. 结果显示, 尘泡质量大多不超过 $10^5 M_{\odot}$, 中值约为 $1.3 \times 10^4 M_{\odot}$.

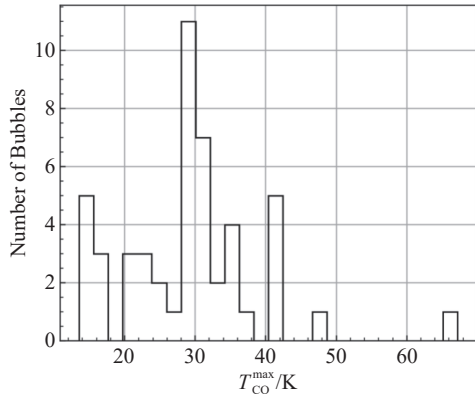
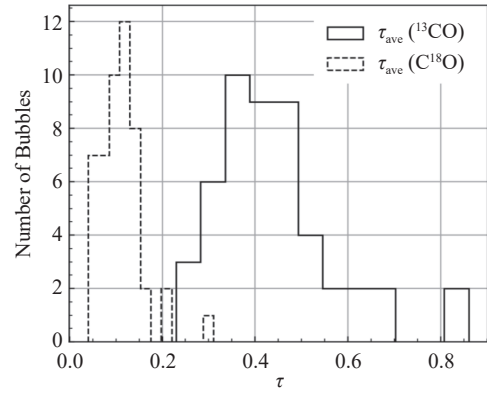
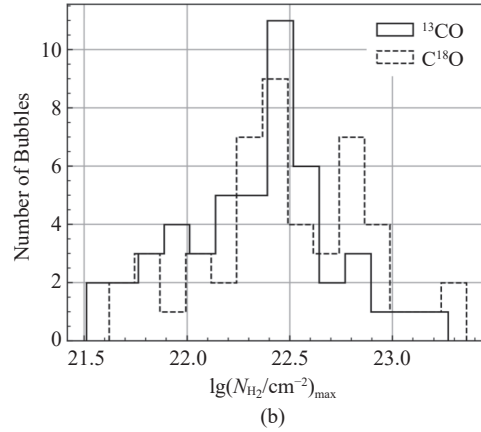
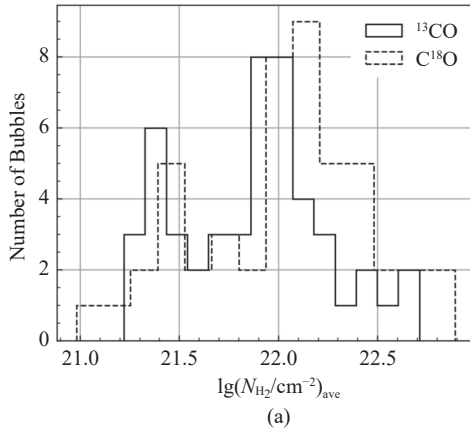


图 10 与尘泡成协的CO分子激发温度峰值直方图

Fig. 10 Histogram of peak excitation temperatures of CO molecules associated with the dust bubbles

图 11 与尘泡成协的CO分子平均光学深度直方图. 实线代表 ^{13}CO , 虚线代表 C^{18}O .Fig. 11 Histogram of average optical depths of CO molecules associated with the dust bubbles. The solid and dashed lines represent ^{13}CO and C^{18}O , respectively.图 12 (a)与尘泡成协的CO分子平均 H_2 柱密度直方图. (b)与尘泡成协的CO分子 H_2 峰值柱密度直方图. 实线代表 ^{13}CO , 虚线代表 C^{18}O .Fig. 12 (a) The histogram of average H_2 column densities of CO molecules associated with the dust bubbles. (b) Histogram of peak H_2 column densities of CO molecules associated with the dust bubbles. The solid and dashed lines represent ^{13}CO and C^{18}O , respectively.

尘泡的形成可能源于电离氢区与星际介质之间的相互作用, 其不同空间位置的谱线可能呈现差异性峰值辐射特征. 为探究其膨胀现象, 选取了均匀分布于与尘泡成协的CO分子气体壳层上的8个采样点, 以p1为起点, 顺时针方向依次标记为p2、p3、p4、p5、p6、p7、p8. 对这8个采样点提取了 ^{12}CO 的谱线数据, 截取与尘泡相关的CO分子气体对应的速度分量, 提取各条谱线的峰值. 随后, 计算这些峰值对应的速度与最佳速度(详见TOC-A2中的 V_t)之间的差值, 定义为相对速度. 以尘泡

G15.684-0.29为例, 图14 (a)展示了与该尘泡相关 ^{12}CO 谱线的速度积分强度图, 并标出了8个采样点. 图14 (b)展示了每个采样点的相对速度. 观察发现, 不同采样点的相对速度相对于最佳速度存在相反的运动方向, 这一现象表明尘泡可能正处于膨胀状态. 最终, 在44个红外尘泡样本中, 共26个样本(占比59.1%)可能存在膨胀运动特征. TOC-A2中列出了尘泡的膨胀速度 V_{exp} , 其膨胀速度均值为 $2.75 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$.

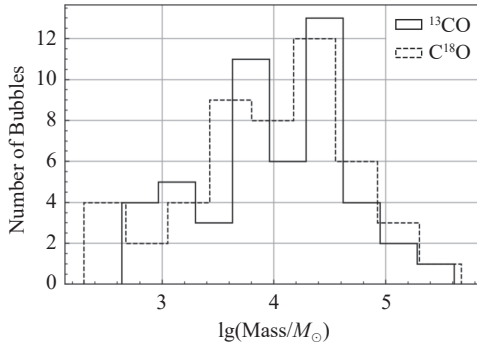


图 13 尘泡的质量直方图. 实线代表 ^{13}CO , 虚线代表 C^{18}O .

Fig. 13 Mass histogram of the dust bubbles. The solid and dashed lines represent ^{13}CO and C^{18}O , respectively.

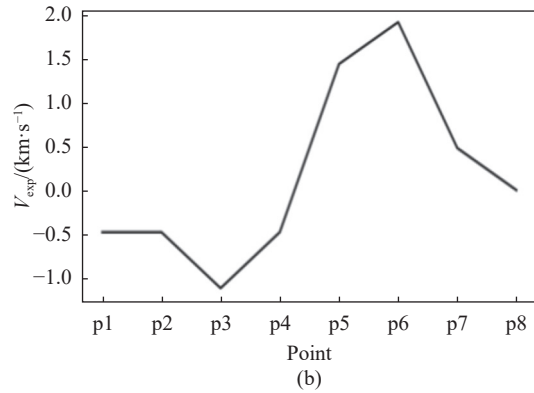
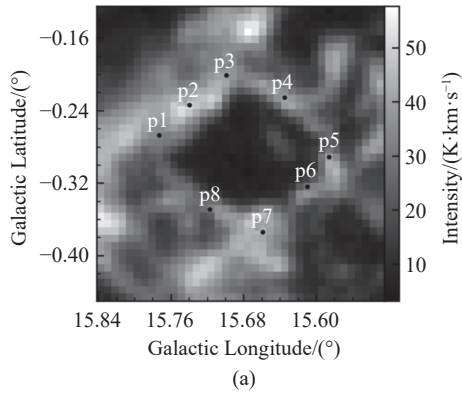


图 14 (a)与尘泡G15.684–0.290相关 ^{12}CO 谱线的速度积分强度(W_{CO})图, 采样点p1、p2、p3、p4、p5、p6、p7、p8以顺时针的方向依次选取. (b)相对速度分布图. 相对速度为采样点中每条谱线峰值与 V_L 的差值.

Fig. 14 (a) The velocity-integrated intensity (W_{CO}) map of the ^{12}CO spectral line associated with the dust bubble G15.684–0.290, with sampling points p1, p2, p3, p4, p5, p6, p7, and p8 selected in a clockwise direction. (b) Relative velocity distribution map. The relative velocity is the difference between the peak of each spectral line at the sampling points and V_L .

对与尘泡成协的CO分子激发温度、光学深度和 H_2 柱密度的统计分析, 揭示了不同尘泡的物理特性分布. 对于大多数尘泡, 利用 ^{13}CO 和 C^{18}O 谱线估算出的平均光学深度分别低于0.5和0.2, 符合光学薄假设. 与尘泡成协的CO分子激发温度的中值约为30 K, 相对于弥散云偏高, 可能有助于恒星形成. 大多数与尘泡成协的CO分子 H_2 柱密度均值及峰值达到 10^{22} cm^{-2} , 26个尘泡可能正在膨胀, 膨胀速度均值为 $2.75 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$, 这可能是由于内部的热气体在高温膨胀过程中与周围物质相互作用, 从而形成了更致密的分子气体结构^[34–36].

综上所述, 我们的研究结果支持红外尘泡作

5 总结与讨论

本文基于WISE、GLIMPSE和MIPSGAL的红外巡天数据, 在 $10^\circ \leq l \leq 20^\circ$ 、 $|b| \leq 5^\circ$ 区域中, 选取出143个已发布的红外尘泡样本. 为了探究红外尘泡与分子气体的成协性, 本文设计了一种基于高斯过程回归的数据分析方法. 利用该方法从银河画卷的CO分子巡天数据中, 发现44个红外尘泡与CO分子气体成协, 占尘泡样本总量的30.8%. 这一结果表明, 并非所有红外尘泡都与CO分子气体成协, 部分尘泡在红外观测上呈现的壳状结构可能是视线上不同气体成分的叠加显示造成的.

为恒星形成触发机制的观点. 尘泡的扩张与周围分子云的相互作用可能对分子云的形态和物理参数产生重要影响, 尘泡的膨胀可能是触发星际介质积累和恒星形成的重要机制. 特别是在高密度区域, 可能正在形成或已经存在致密团块.

基于本文的研究结果, 建议未来可以利用更高分辨率的观测数据来更精确地确定尘泡与分子气体的成协性. 此外, 多波段数据将有助于全面理解尘泡的性质, 特别是尘泡的形成和演化. 未来可以针对这一类与尘泡相关的CO分子气体样本进行更深入的研究, 探究红外尘泡触发恒星形成的更多证据.

致谢 这项研究利用了银河画卷巡天计划 (MWISP) 项目的数据, 该项目是使用 PMODLH-13.7 m 望远镜沿北银河系平面对 ^{12}CO & ^{13}CO & C^{18}O 进行的多谱线巡天. 我们感谢 MWISP 工作组的所有成员, 特别是 PMODLH-13.7 m 望远镜的工作人员, 感谢他们的长期支持.

参 考 文 献

- [1] 张传朋, 王俊杰. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2017, 47: 17
- [2] Deharveng L, Schuller F, Anderson L D, et al. *A&A*, 2010, 523: 1567
- [3] Beaumont C N, Williams J P. *ApJ*, 2010, 709: 791
- [4] Kendrew S, Simpson R, Bressert E, et al. *ApJ*, 2012, 755: 71
- [5] Thompson M A, Urquhart J S, Moore T J T, et al. *MNRAS*, 2011, 421: 408
- [6] Benjamin R A, Churchwell E, Babler B L, et al. *PASP*, 2003, 115: 953
- [7] Carey S J, Noriega-Crespo A, Mizuno D R, et al. *PASP*, 2009, 121: 76
- [8] Wright E L, Eisenhardt P R M, Mainzer A K, et al. *AJ*, 2010, 140: 1868
- [9] Watson C, Povich M S, Churchwell E B, et al. *ApJ*, 2008, 681: 1341
- [10] Anderson L D, Bania T M, Balser D S, et al. *ApJS*, 2011, 194: 32
- [11] Anderson L D, Bania T M, Balser D S, et al. *ApJS*, 2013, 212: 216
- [12] Hattori Y, Kaneda H, Ishihara D, et al. *PASJ*, 2016, 68: 37
- [13] Liu D, Xu Y, Li Y, et al. *ApJ*, 2024, 964: 93
- [14] Shan W L, Yang J, Shi S C, et al. *ITTST*, 2012, 2: 593
- [15] Yan Q Z, Xu Y, Zhang B, et al. *AJ*, 2016, 152: 117
- [16] 孙继先, 逯登荣, 杨戟, 等. 天文学报, 2018, 59: 12
- [17] 李振强, 张旭国, 徐烨, 等. 天文学报, 2021, 62: 21
- [18] Li Z Q, Zhang X G, Xu Y, et al. *ChA&A*, 2021, 45: 559
- [19] Su Y, Yang J, Zhang S B, et al. *ApJS*, 2019, 240: 9
- [20] Churchwell E, Babler B L, Meade M R, et al. *PASP*, 2009, 121: 213
- [21] Churchwell E, Povich M S, Allen D, et al. *ApJ*, 2006, 649: 759
- [22] Churchwell E, Watson D F, Povich M S, et al. *ApJ*, 2007, 670: 428
- [23] Simpson R J, Povich M S, Kendrew S, et al. *MNRAS*, 2012, 424: 2442
- [24] Jayasinghe T, Dixon D, Povich M S, et al. *MNRAS*, 2019, 488: 1141
- [25] Hanaoka M, Kaneda H, Suzuki T, et al. *PASJ*, 2019, 71: 6
- [26] Perez-Cruz F, Murillo-Fuentes J J, Caro S. *ITSP*, 2008, 56: 5283
- [27] Yuan J H, Wu Y, Li J Z, et al. *ApJ*, 2014, 797: 40
- [28] Ji W G, Zhou J J, Esimbek J, et al. *A&A*, 2012, 544: A39
- [29] Sherman R A. *ApJ*, 2012, 760: 58
- [30] Li X, Esimbek J, Zhou J, et al. *MNRAS*, 2019, 487: 1517
- [31] Mangum J G, Shirley Y L. *PASP*, 2015, 127: 266
- [32] Areal M B, Paron S, Ortega M E, et al. *PASA*, 2019, 36: e049
- [33] Reid M J, Menten K M, Brunthaler A, et al. *ApJ*, 2019, 885: 131
- [34] Li H, Li D, Qian L, et al. *ApJS*, 2015, 219: 20
- [35] Arce H G, Borkin M A, Goodman A A, et al. *ApJ*, 2011, 742: 105
- [36] 孙金旭, 李金增, 刘洪礼, 等. 天文学进展, 2021, 39: 16

Correlation Study between Infrared Dust Bubbles and CO Molecular Gas in the Milky Way

ZENG Shu-guang^{1,2} ZHANG Jun-jie^{1,2} HUANG Yao^{1,2} LIU De-jian^{1,2} ZHANG Peng^{1,2}
 JIANG Zhi-bo³ CHEN Zhi-wei³ ZHENG Sheng^{1,2} ZHANG Rui^{1,2} LUO Xiao-yu^{1,2}

(¹ Center for Astronomy and Space Sciences, China Three Gorges University, Yichang 443002)

(² College of Mathematics and Physics, China Three Gorges University, Yichang 443002)

(³ Purple Mountain Observatory, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210023)

ABSTRACT The study systematically analyzes the correlation between infrared dust bubbles and CO molecular gas in the Galactic region where $10^\circ \leq l \leq 20^\circ$ and $|b| \leq 5^\circ$, based on infrared survey data from WISE (Wide-Field Infrared Survey Explorer), GLIMPSE (Galactic Legacy Infrared Mid-Plane Survey Extraordinaire), and MIPS GAL (Multiband Imaging Photometer for Spitzer Galactic), combined with CO molecular gas survey data from the Milky Way Imaging Scroll Painting. A data analysis method based on Gaussian process regression was designed for the study. Among the 143 published infrared dust bubble samples, 44 bubbles were found to correlate with CO molecular gas, accounting for 30.8% of the total sample size. The study estimates the physical parameters such as CO molecular optical depth, H_2 column density, and mass associated with bubbles and conducts statistical analysis. The average column density of the 44 bubbles is calculated to be approximately 10^{22} cm^{-2} , with most bubble masses not exceeding $10^5 M_\odot$. The H_2 column density of the molecular gas associated with the infrared dust bubbles generally reached the conditions for dense clumps that could potentially form stars. There are 26 bubbles that may be expanding, with an average expansion velocity of $2.75 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$. The research results provide samples for understanding infrared dust bubbles and star formation studies.

Key words stars: formation, ISM: bubbles, methods: data analysis